



DEUTSCHES
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 42 28 862.2
22 Anmeldetag: 29. 8. 92
43 Offenlegungstag: 3. 3. 94

DE 42 28 862 A 1

71 Anmelder:
Fa. Carl Zeiss, 89520 Heidenheim, DE

72 Erfinder:
Noll, Gert, Dr., 7920 Heidenheim, DE; Metz, Bodo,
7082 Oberkochen, DE

54 Laseranordnung zur Erzeugung von UV-Strahlung

57 Laseranordnung zur Erzeugung von UV-Strahlung mit einem Laser mit Lasermedium (Nd:YAG u. a.) (4) und Resonatorspiegeln (1, 7) die einen ersten Resonator bilden, mit einem ersten Frequenzverdoppler-Kristall (6) im ersten Resonator des Lasers (intracavity) und mit einem zweiten Frequenzverdoppler-Kristall (10), der mit dem ersten Frequenzverdoppler-Kristall (6) in einem zweiten Resonator für das vom ersten Frequenzverdoppler-Kristall (6) erzeugte Licht angeordnet ist.



BEST AVAILABLE COPY

AK

DE 42 28 862 A 1

Die Erfindung betrifft eine Laseranordnung zur Erzeugung von UV-Strahlung mit einem Laser mit Lasermedium und Resonatorspiegeln, die einen ersten Resonator bilden, mit einem ersten Frequenzverdoppler-Kristall im ersten Resonator des Lasers und mit einem zweiten Frequenzverdoppler-Kristall.

Eine solche Laseranordnung ist aus P.E. Perkins und Th.S. Fahlen, IEEE J. Quantum Electronics QE-21 (1985), 1636-1638 bekannt mit einem CW-gepumpten Nd:YAG-Laser mit akustooptischem Q-switch und Intracavity-KTP-Frequenzverdoppler-Kristall. Dessen Licht wird in einem KD*P-Frequenzverdoppler-Kristall in einfachem Durchgang ein zweites Mal frequenzverdoppelt auf 266 nm Wellenlänge.

Da der Wirkungsgrad der Frequenzverdopplung in nichtlinearen Kristallen dem Quadrat der Leistungsdichte proportional ist, wird eine einfache Frequenzverdopplung vorteilhaft innerhalb des primären Laserresonators vorgenommen, wie in Perkins und Fahlen, oder z. B. US 4 933 945. Dies findet jedoch seine Grenzen in der Verschlechterung der Resonatorqualität durch die zusätzlichen Elemente.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Laseranordnung zur Erzeugung von UV-Strahlung mittels zweifacher Frequenzverdopplung in ihrem Wirkungsgrad zu steigern.

Die Lösung dieser Aufgabe gelingt mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1, wonach das Intracavity-Prinzip zur Steigerung der Leistungsdichte auch auf die zweite Frequenzverdopplungs-Stufe angewandt wird.

Mit wellenlängenselektiv verspiegelten, dichroitischen Spiegeln gelingt es, den Resonator für die Grundwellenlänge und einen Resonator für die erste Harmonische im Bereich des ersten Frequenzverdoppler-Kristalls zu überlagern, ohne daß störende Qualitätsverluste auftreten. Der zusätzliche Resonator für das vom ersten Frequenzverdoppler-Kristall erzeugte Licht ist so realisierbar und die Steigerung der Leistungsdichte am zweiten Frequenzverdoppler-Kristall wird erreicht. Vorteilhaft ist es, wenn der erste Resonator einen Umlenkspiegel enthält.

Die Laseranordnung ist sowohl mit seitwärts, etwa mit Gasentladungslampen, oder mit axial gepumptem Lasermedium vorteilhaft zu realisieren. Letztere Anordnung wird auch mit beidseitigen Pumplichtquellen, bevorzugt Laserdioden, ausgeführt und läßt sich besonders vorteilhaft realisieren, wenn der erste Resonator zwei Umlenkspiegel enthält.

Eine besonders vorteilhafte Anordnung mit wenigen Bauteilen ergibt sich, wenn gemäß Anspruch 7 der Umlenkspiegel auf einer planparallelen Platte angeordnet ist, die für die Strahlung des ersten Frequenzverdoppler-Kristalls transparent und reflexfrei ist, und deren Rückseite als hochreflektierender Spiegel für die UV-Strahlung beschichtet ist. Hat der erste Resonator zwei Umlenkspiegel, dann ist die Anordnung nach Anspruch 8 besonders vorteilhaft, wonach der erste Umlenkspiegel für die Strahlung des Lasermediums hochreflektierend und für Licht aus der Pumplichtquelle transparent und reflexfrei ist, und der zweite Umlenkspiegel für die Strahlung des Lasermediums hochreflektierend und auf einer planparallelen Platte angeordnet ist, die für die Strahlung des ersten Frequenzverdoppler-Kristalls transparent und reflexfrei ist, und deren Rückseite als hochreflektierender Spiegel für die UV-Strahlung be-

schichtet ist und so die UV-Strahlung aus der Laseranordnung auskoppelt.

Schließlich sind besonders geeignete Materialien für das Lasermedium Nd:YAG, Nd:YLF, oder Nd:Glas für den ersten Frequenzverdoppler-Kristall KTP, oder LBO und für den zweiten Frequenzverdoppler-Kristall KD*P, ADP, oder BBO.

Im einzelnen wird die Erfindung anhand der in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiele beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 Eine Laseranordnung mit zweimaliger Frequenzverdopplung mit einem Umlenkspiegel;

Fig. 2 eine Laseranordnung mit zweimaliger Frequenzverdopplung mit zwei Umlenkspiegeln;

Fig. 3 eine linear aufgebaute Laseranordnung mit zweimaliger Frequenzverdopplung.

Fig. 1 zeigt einen Nd:YAG-Stab als Lasermedium (4) in einem Resonator, bestehend aus den beiden Endspiegeln (1) und (7) und dem Umlenkspiegel (8). Durch eine Gasentladungslampe (41) in Verbindung mit einem Spiegel (42) wird das Lasermedium (4) transversal gepumpt. Zwischen dem Umlenkspiegel (8) und dem zweiten Endspiegel (7) ist ein Frequenzverdoppler-Kristall (6) aus KTP angeordnet. Zur Erhöhung der Leistungsdichte und damit des Wirkungsgrads der Umwandlung wird durch die konkave Form des zweiten Endspiegels (7) und eine Sammellinse (5) zwischen Lasermedium (4) und Umlenkspiegel (8) die IR-Strahlung des Lasermediums (4) im Frequenzverdoppler-Kristall (6) fokussiert. Der Spiegel (8) ist dichroitisch und transmittiert die frequenzverdoppelte VIS-Strahlung reflexionsfrei durch die transparente, planparallele Tragplatte.

Eine akusto-optische Modulatorzelle (2) ermöglicht einen Q-Switch des Lasers und damit eine Steigerung der Spitzen-Leistungsdichte und des Frequenzverdopplungs-Wirkungsgrads. Die ebenfalls im Resonator angeordnete Modenblende (3) sorgt für TEM₀₀-Betrieb des Nd:YAG-Lasers und beschränkt damit die IR-Strahlung auf die für die Frequenzverdopplung effektivste Mode.

Soweit ist ein frequenzverdoppelter Festkörperlaser Stand der Technik und sind dem Fachmann Details der Ausführung allgemein zugänglich, ohne daß hier näher darauf eingegangen werden muß.

Zur Erzeugung der vierten Harmonischen wird erfindungsgemäß in der optischen Achse des zweiten Endspiegels (7), des KTP-Kristalls (6) und des Umlenkspiegels (8) mit einem dritten Endspiegel (11) und einer Konvexlinse (9) ein zweiter Resonator für das VIS-Licht des ersten Frequenzverdoppler-Kristalls (6) aufgebaut. Im Fokusbereich zwischen Konvexlinse (9) und drittem Endspiegel (11) ist der zweite Frequenzverdoppler-Kristall (10) aus KD*P angeordnet.

Der dritte Endspiegel (11) und die Rückseite des Umlenkspiegels (8) sind für die UV-Strahlung des zweiten Frequenzverdoppler-Kristalls (10) bei 266 nm zusätzlich verspiegelt und so wird etwa in der Achse des Lasermediums (4) die UV-Strahlung ausgekoppelt. Damit wird die VIS-Strahlung des ersten Frequenzverdoppler-Kristalls (6) komplett im Resonator zwischen den Endspiegeln (7) und (11) gehalten. Das beim einmaligen Durchlaufen des zweiten Frequenzverdoppler-Kristalls (10) nicht absorbierte VIS-Licht geht somit nicht verloren, sondern kann bei erneutem Durchlaufen des zweiten Frequenzverdoppler-Kristalls (10) wiederum für die Erzeugung der UV-Strahlung genutzt werden. Eine fünffache Effizienz ist damit erreichbar.

Bei Anwendung des Pulsbetriebs mit Q-Switch mit dem akustooptischen Modulator (2) kann durch optima-

le Anpassung der Pulsfolgefrequenz und der optischen Weglängen erreicht werden, daß sich in den Frequenzverdoppler-Kristallen (6) und (10) mehrere hin- und hergehende Lichtpulse überlagern und so die maximale Intensität um den Wirkungsgrad steigern. Destruktive Interferenz ist aufgrund der kurzen Kohärenzlänge des IR-Laserlichts vom Lasermedium (4) kein Problem.

Zur Minderung von Verlusten des VIS-Lichts im zweiten Resonator, sind die optischen Elemente (6 bis 11) mit geeigneten Antireflex- bzw. Spiegel-Schichten (7, 11) zu versehen. Da kein optisches Element der ganzen Laseranordnung von mehr als zwei Wellenlängen berührt wird, ist das kein Problem. Der Frequenzverdoppler-Kristall (6) ist beidseitig für IR und VIS antireflexbeschichtet, der Endspiegel (7) ist für IR und VIS hochreflektierend.

Der Umlenkspiegel (8) ist für IR hochreflektierend und für VIS antireflexbeschichtet. Seine Tragplatte ist für VIS transparent und rückseitig für VIS antireflexbeschichtet und für die UV-Strahlung hochreflektierend beschichtet. Die Linse (9) ist für VIS und UV antireflexbeschichtet und der Spiegel (11) ist für VIS und UV hochreflektierend.

Der zweite Frequenzverdoppler-Kristall (10), insbesondere aus dem hygroskopischen KD*P, ist kommerziell nicht mit Antireflexschichten verfügbar. Es ist jedoch möglich, auf die beiden Endseiten Quarzglasplatten, deren Brechungsindex sehr gut angepaßt ist, anzusprengen oder anzukitten, welche auf den jeweiligen Außenseiten in bekannter Weise für VIS und UV antireflexbeschichtet sind. Damit sind gleichzeitig die Oberflächen des zweiten Frequenzverdoppler-Kristalls (10) geschützt.

Die zur effektiven Frequenzverdopplung nötigen hohen Leistungsdichten führen zur Erwärmung und zu Temperaturgradienten und damit zu Störungen der optischen Elemente, z. B. durch Ausbildung von thermischen Linsen und Dephasing-Effekt im KD*P-Kristall (10).

Die Verwendung dünner langer Frequenzverdoppler-Kristalle (6) und (10) ist daher vorteilhaft. Ist der Kristalldurchmesser nur wenig größer als der Lichtbündeldurchmesser, so ist die Wärmebelastung über den Querschnitt gleichmäßiger und eine effektive Kühlung über eine Fassung ist möglich. Große Kristalllänge ergibt effektive Frequenzumwandlung bei geringerer Fokussierung und damit geringerer thermischer Spitzenbelastung und geringerem Zerstörungsrisiko. Weiter ist es wichtig, den Anteil der für die Frequenzverdopplung nicht oder schlechter wirksamen Strahlung möglichst gering zu halten. Diesem Ziel dienen die Modenblende (3) zum Erzwingen des TEM₀₀-Betriebs und die akustooptische Modulatorzelle (2) zum Q-Switch, also zur Pulserzeugung. Alternativ kann auch die Mode-Locking-Technik angewendet werden. Dann müssen die Umlaufzeiten des IR-Resonators zwischen den Endspiegeln (1) und (7) und des VIS-Resonators zwischen den Endspiegeln (7) und (11) so angepaßt werden, daß sich die Lichtpulse im Kristall (10) zeitlich treffen (vergl. M. A. Persaud et al. IEEE J. Quantum El. 26 (1990), 1253 ff). Das Lasermedium (4) kann generell auch mit Lichtimpulsen gepumpt werden.

Die in diesem Beispiel verwendeten Materialien — Nd:YAG für das Lasermedium (4), KTP für den ersten Frequenzverdoppler-Kristall (6) und KD*P für den zweiten Frequenzverdoppler-Kristall (10) stellen eine effektive Kombination für die Erzeugung von UV-Strahlung mit 266 nm Wellenlänge dar.

Andere Materialkombinationen sind jedoch ebenfalls für erfindungsgemäße Laseranordnungen brauchbar. Eine gewisse Abstimmbarkeit der Wellenlänge und niedrigere Wellenlänge ist mit Nd:YLF oder Nd:Glas für das Lasermedium (4) erreichbar. LBO (Lithiumborat) ist in Kombination mit diesen Lasermedien (4) eine Alternative zu KTP als erster Frequenzverdoppler-Kristall (6).

Mit der niedrigeren Wellenlänge (1053 nm) von Nd:YLF wäre eine Phasenanpassung des KD*P-Kristalls als zweiter Frequenzverdoppler-Kristall (10) nur bei Abkühlung auf ca. 170 K erreichbar. Daher ist hier der BBO-Kristall (Beta-Bariumborat) eine Alternative, obwohl dabei die Justage kritischer ist und durch die Doppelbrechung VIS- und UV-Strahl seitwärts auseinanderlaufen, so daß nur ein kurzer Kristall bei engem Fokus brauchbar ist. Die Zerstörschwelle von BBO ist aber sehr hoch, so daß eine starke Fokussierung auch möglich ist. Hohe Winkelakzeptanz für VIS und hohe Nichtlinearität und die Verwendbarkeit für VIS auch unterhalb 530 nm sind die Vorteile von ADP (Ammoniumdihydrogenphosphat) als zweiter Frequenzverdoppler-Kristall (10). Ein Problem ist seine Temperaturempfindlichkeit.

Andere Materialien sind daneben ebenso für die erfindungsgemäße Laseranordnung brauchbar.

Fig. 2 zeigt eine alternative Ausführung der erfindungsgemäßen Laseranordnung mit zwei Umlenkspiegeln (81, 82). Der Laserstab (4) trägt auf einer Seite den Endspiegel (14), der mit den zwei Umlenkspiegeln (81) und (82), dem Endspiegel (7) und der Linse (5) den IR-Resonator bildet. In diesem ist auch der erste Frequenzverdoppler-Kristall (6) untergebracht. Die Linse (5) bewirkt im Verbund mit dem konkaven Endspiegel (7) die Fokussierung des IR-Lichts im ersten Frequenzverdoppler-Kristall (6) und kann im Prinzip irgendwo zwischen Lasermedium (4) und Frequenzverdoppler-Kristall (6) angeordnet werden. Zwischen den beiden Umlenkspiegeln (81) und (82) wird die Linse (5) jedoch nur vom IR-Licht berührt und braucht daher nur für eine Wellenlänge entspiegelt zu werden. Der komplette zweite Resonator für das VIS-Licht und die UV-Strahlungserzeugung mit den Elementen (6, 7, 82, 9, 10 und 11) ist gleich wie in Fig. 1 gezeigt und oben beschrieben.

Durch die Einführung des zusätzlichen Umlenkspiegels (81) ist es jedoch möglich, das Lasermedium (4) von beiden Stirnseiten axial zu pumpen, wozu zwei Laserdiodenarrays (43, 44) mit Fokussierlinsen (45, 46) vorgesehen sind. Der transparente Träger des Umlenkspiegels (81) und das Lasermedium (4) einschließlich Endspiegel (14) sind dazu mit geeigneten Antireflexschichten für das Pumplicht durchgängig gemacht.

Eine solche Pumpanordnung für Nd:YAG-Laser ist z. B. aus US 4.710.940 bekannt.

Eine solche Anordnung mit Laserdiodenarrays (43) und (44) ist sehr kompakt und hat einen hohen Pumpwirkungsgrad, ist mit derzeit verfügbaren Laserdiodenarrays aber auf eine Pumpleistung in der Größenordnung 10 W beschränkt. Natürlich können an die Stelle der Laserdiodenarrays (43) und (44) auch andere Pumplichtquellen gesetzt werden. Die Anordnung kann abgewandelt werden, und z. B. zwischen den Umlenkspiegeln (81) und (82) kann zusätzlich ein Modulator zum Q-Switch eingebaut werden.

Fig. 3 zeigt eine rein lineare erfindungsgemäße Laseranordnung mit Lasermedium (4) inklusive Pumplampe (41), erstem Frequenzverdoppler-Kristall (6) und zweitem Frequenzverdoppler-Kristall (10). Die Spiegel

(1, 31, 32, 33) sind geeignet beschichtet, so daß ein IR-Resonator (I) zwischen den Spiegeln (1) und (32) und ein VIS-Resonator (II) zwischen den Spiegeln (31) und (33) gebildet wird.

Die Sammellinsen (5, 9 und 34) sowie die konkave Ausführung des Spiegels (33) sorgen für die erforderliche Fokussierung in den Frequenzverdoppler-Kristallen (6) und (10).

Wie in den vorhergehenden Beispielen nach Fig. 1 und Fig. 2 wird jede optische Schicht der Laseranordnung von höchstens zwei Licht-Wellenlängen berührt, so daß die Ausführung geeigneter dichroitischer Reflex- und Antireflexschichten unproblematisch ist.

Das aus tretende UV-Licht kann durch eine konkav-konvexe Ausführung des Trägers des Endspiegels (33) und durch eine zusätzliche Linse oder einen zusätzlichen Spiegel nach Bedarf gebündelt werden. Das Lasermedium (4) kann statt transversal durch die Gasentladungslampe (41) auch achsial durch den Endspiegel (1) gepumpt werden und weitere Abwandlungen der gezeigten Beispiele Fig. 1 und 3 sind im Rahmen der Erfindung vielfältig möglich.

Patentansprüche

1. Laseranordnung zur Erzeugung von UV-Strahlung mit einem Laser mit Lasermedium (4) und Resonatorspiegeln (1, 7) die einen ersten Resonator bilden, mit einem ersten Frequenzverdoppler-Kristall (6) im ersten Resonator des Lasers und mit einem zweiten Frequenzverdoppler-Kristall (10), dadurch gekennzeichnet, daß der erste und der zweite Frequenzverdoppler-Kristall (6, 10) in einem zweiten Resonator für das vom ersten Frequenzverdoppler-Kristall (6) erzeugte Licht angeordnet sind.
2. Laseranordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Resonator einen Umlenkspiegel (8) enthält (Fig. 1).
3. Laseranordnung nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Lasermedium seitwärts gepumpt wird (Fig. 1).
4. Laseranordnung nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Lasermedium (4) endseitig gepumpt wird.
5. Laseranordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß beidseitig des Lasermediums (4) Pumplichtquellen (43, 44) angeordnet sind (Fig. 2).
6. Laser nach mindestens einem der Ansprüche 2—5, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Resonator zwei Umlenkspiegel (81, 82) enthält (Fig. 2).
7. Laser nach mindestens einem der Ansprüche 2—4, dadurch gekennzeichnet, daß der Umlenkspiegel (8) auf einer planparallelen Platte angeordnet ist, die für die Strahlung des ersten Frequenzverdopplerkristalls (6) transparent und reflexfrei ist, und deren Rückseite als hochreflektierender Spiegel für die UV-Strahlung beschichtet ist.
8. Laser nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Umlenkspiegel (81) für die Strahlung des Lasermediums (4) hochreflektierend und für Licht aus der Pumplichtquelle (44) transparent und reflexfrei ist, und daß der zweite Umlenkspiegel (82) für die Strahlung des Lasermediums (4) hochreflektierend und auf einer planparallelen Platte angeordnet ist, die für die Strahlung des ersten Frequenzverdopplerkristalls (6) transparent und reflexfrei ist, und deren Rückseite als hochreflektierender

Spiegel für die UV-Strahlung beschichtet ist.
9. Laseranordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1—8, dadurch gekennzeichnet, daß das Lasermedium (4) aus Nd:YAG oder Nd:YLF, oder Nd:Glas, der erste Frequenzverdoppler-Kristall (6) aus KTP, oder LBO und der zweite Frequenzverdoppler-Kristall (10) aus KD*P, ADP oder BBO besteht.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 1

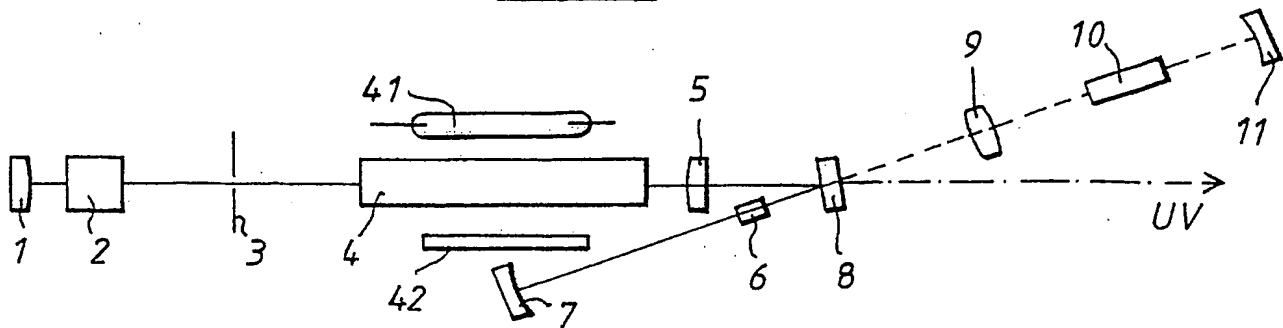


FIG. 2

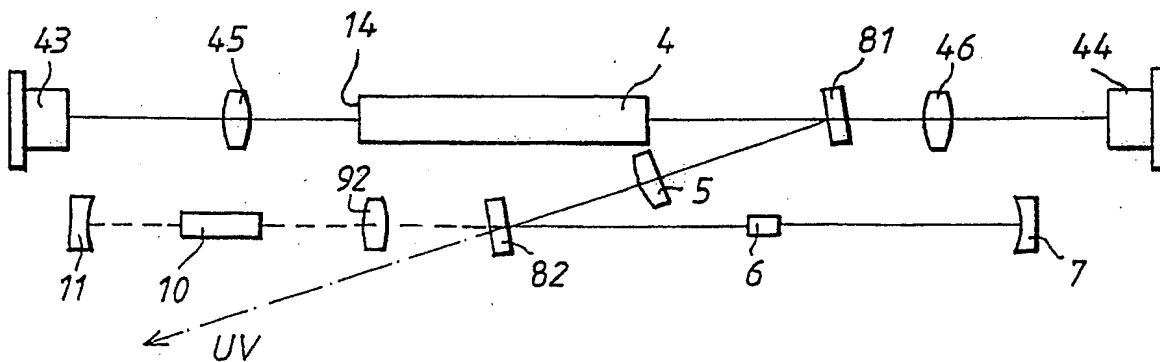
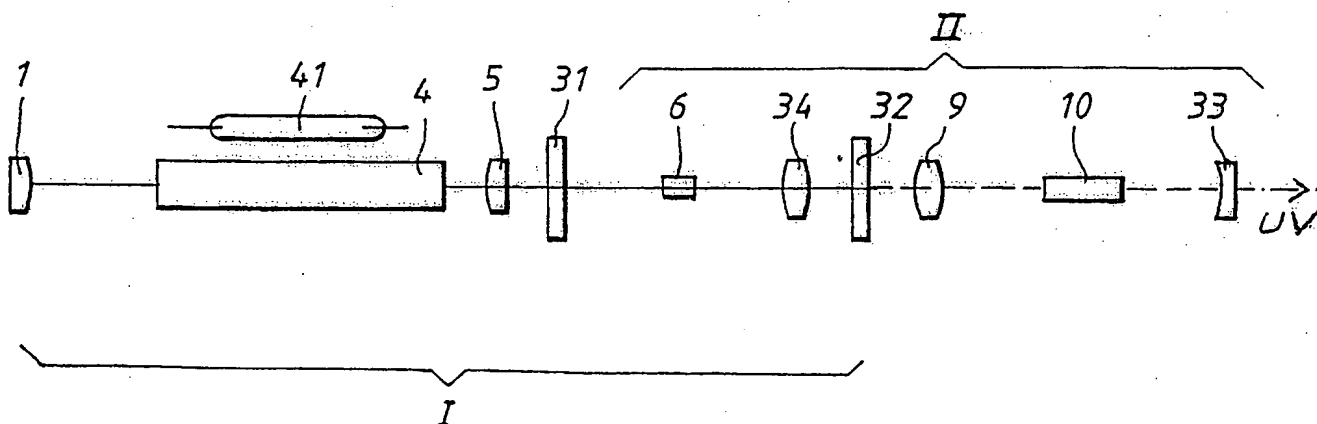


FIG. 3



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.